



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Глава 7. Термодинамические основы управления ГТД

§ 7.6. Формулы приведения

Изучение подобных режимов представляет большой практический интерес, так как позволяет получить простые формулы для пересчета параметров двигателя, замеренных при одних внешних условиях, на другие условия эксплуатации. С помощью таких формул можно по характеристикам, которые получены в результате испытания двигателя при любых атмосферных условиях, определить параметры для стандартных атмосферных условий (САУ) и в этих условиях сравнивать характеристики различных двигателей.

В качестве стандартных атмосферных условий на земле (на уровне моря) принимаются следующие параметры воздушного потока: $T_H^* = 288 \text{ K}$, $p_H^* = 101325 \text{ Па}$.

Определение параметров на подобном режиме в стандартных условиях по их значениям при любых атмосферных условиях называется приведением параметров двигателя к САУ.

Формулы, по которым приводятся параметры, называются **формулами приведения**, а сами параметры – **приведенными параметрами**.

На подобных режимах отношение давления (температуры) в любом i -м сечении двигателя к давлению (температуре) в сечении на входе в двигатель сохраняется неизменным. Поэтому стандартным условиям в сечении Н соответствуют вполне определенные (приведенные) параметры в любом сечении проточной части двигателя. Параметры, приведенные к САУ, обозначаются индексом «пр».

Для значений полного давления рабочего тела в любом сечении двигателя на подобных режимах можно записать соотношение:

$$\frac{p_i^*}{p_H^*} = \frac{p_{i.\text{пр}}^*}{101325} = \text{const} .$$

Следовательно приведенное давление можно определить по формуле

$$p_{i.\text{пр}}^* = p_i^* \cdot \frac{101325}{p_H^*} .$$

Аналогично для температуры:

$$\frac{T_i^*}{T_H^*} = \frac{T_{i.\text{пр}}^*}{288} = \text{const} ;$$

$$T_{i.\text{пр}}^* = T_i^* \cdot \frac{288}{T_H^*} .$$

Необходимо особо подчеркнуть, что на подобных режимах приведенные параметры сохраняются постоянными. А физические значения p_i^* и T_i^* изменяются пропорционально соответственно давлению p_H^* и температуре T_H^* воздушного потока на входе в двигатель.

Формулы приведения других параметров можно получить, выразив их через полное давление и полную температуру.

Формулу приведения для удельной работы турбины или компрессора L получим, выразив её через полную температуру на входе в соответствующий узел:

$$L = c_{pi} \cdot T_i^* \cdot l.$$

Для значений удельной работы на подобных режимах можно записать соотношение:

$$\frac{L}{T_H^*} = \frac{L_{\text{пр}}}{288} = \text{const}.$$

Следовательно приведенное значение удельной работы определяется по формуле

$$L_{\text{пр}} = L \cdot \frac{288}{T_H^*}.$$

Удельная работа приводится к САУ по той же формуле, что и температура рабочего тела, поскольку на подобных режимах она изменяется пропорционально температуре.

Аналогично осуществляется приведение относительного расхода топлива q_m , так как он пропорционален разности температур $(T_{\Gamma}^* - T_{\text{К}}^*)$. Выразив эти температуры через их приведенные значения, получим

$$\frac{q_m}{T_{\text{Н}}^*} = \frac{q_{m.\text{пр}}}{288} = \text{const};$$

$$q_{m.\text{пр}} = q_m \cdot \frac{288}{T_{\text{Н}}^*}.$$

Поскольку относительный расход топлива на подобных режимах изменяется, то и коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1 / (q_m \cdot L_0)$ определяющий соотношение между расходом воздуха и расходом топлива, не сохраняется постоянным. Изменяется, следовательно, и характер работы камеры сгорания. Таким образом, на подобных режимах работы двигателя подобие процессов в камере сгорания, строго говоря, не обеспечивается.

Формулу приведения для скорости потока c_i получим, выразив температуру T_i^* в соотношении

$$c_i = \lambda_i \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R \cdot T_i^*}$$

через ее приведенное значение. Тогда

$$\frac{c_i}{\sqrt{T_H^*}} = \frac{c_{i.\text{пр}}}{\sqrt{288}} = \text{const};$$

$$c_{i.\text{пр}} = c_i \cdot \sqrt{\frac{288}{T_H^*}}.$$

Формула справедлива как для абсолютной, так для осевой и окружной скоростей.

Поскольку окружная скорость пропорциональна частоте вращения ротора $u \sim n$, то формула приведения частоты вращения имеет аналогичный вид:

$$n_{\text{пр}} = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{\text{Н}}^*}}.$$

Формула приведения справедлива и для удельной тяги, поскольку $P_{\text{уд}}$ – это разность скоростей $(c_c - V_{\text{п}})$:

$$P_{\text{уд.пр}} = P_{\text{уд}} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{\text{Н}}^*}}.$$

Таким образом, скорость потока в любом сечении двигателя, частота вращения ротора и удельная тяга на подобных режимах пропорциональны.

Следует помнить, что приведенная частота $n_{\text{пр}}$, а следовательно и положение рабочей точки на характеристике компрессора, определяется не только физической частотой вращения ротора n , но и полной температурой воздушного потока на входе в двигатель $T_{\text{Н}}^*$, то есть от скорости полета $V_{\text{п}}$ и температуры наружного воздуха $T_{\text{Н}}$.

Чтобы получить формулу приведения для расхода рабочего тела G_i , выразим давление p_i^* и температуру T_i^* в уравнении расхода через их приведенные значения:

$$\frac{G_i \cdot \sqrt{T_H^*}}{p_H^*} = \frac{G_{i.пр} \cdot \sqrt{288}}{101325} = \text{const};$$

$$G_{i.пр} = G_i \cdot \frac{101325}{p_H^*} \cdot \sqrt{\frac{T_H^*}{288}}.$$

Расход воздуха через двигатель на подобных режимах изменяется пропорционально p_H^* и обратно пропорционально $\sqrt{T_H^*}$.

Подставив q_m и G_{KC} , выраженные через их приведенные значения, в соотношение

$$G_m = q_m \cdot G_{KC},$$

получим формулу приведения расхода топлива:

$$G_{m.пр} = G_m \cdot \frac{101325}{p_H^*} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_H^*}}.$$

Формулу приведения тяги получим, подставив в соотношение

$$P = G_B \cdot P_{уд}$$

расход G_B и удельную тягу $P_{уд}$, выраженные через их приведенные значения:

$$P_{пр} = P \cdot \frac{101325}{p_H^*}.$$

Поделив $G_{mпр}$ на $P_{пр}$, получим формулу приведения для удельного расхода топлива:

$$C_{уд.пр} = C_{уд} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_H^*}}.$$

Если режимы двигателя подобны, то при изменении внешних условий тяга изменяется пропорционально p_H^* , расход топлива – пропорционально произведению $p_H^* \sqrt{T_H^*}$, а удельный расход топлива – пропорционально $\sqrt{T_H^*}$.

Мощность компрессора или турбины пропорциональна произведению удельной работы на расход рабочего тела. Например, для эффективной мощности ГТД СТ

$$N_e = L_{\text{СТ}} \cdot G_{\text{ГТД}} \cdot \eta_{\text{м.СТ}}$$

Выразив работу $L_{\text{СТ}}$ и расход $G_{\text{ГТД}}$ через их приведенные значения, получим

$$N_{\text{е.пр}} = N_e \cdot \frac{101325}{p_H^*} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_H^*}}$$

На подобных режимах мощность двигателя, как и расход топлива, изменяется пропорционально произведению $p_H^* \sqrt{T_H^*}$. Поэтому эффективный удельный расход топлива C_e , характеризующий эффективность турбовальных (турбовинтовых) двигателей, сохраняется постоянным

$$C_{\text{е.пр}} = C_e$$

Приведение к САУ по полученным формулам выполняется по температуре и давлению в сечении Н на входе в двигатель, поэтому все рассмотренные приведенные параметры имеют одинаковый физический смысл: они фактически реализуются на двигателе, то есть равны физическим параметрам в процессе испытаний, если в сечении Н температура и давление равны их стандартным значениям.

Однако приведение к САУ может выполняться не только по T_H^* и p_H^* , но и по температуре и давлению в других сечениях двигателя. Существуют, следовательно, различные приведенные параметры, соответствующие одним и тем же физическим параметрам и различным условиям приведения. Необходимость такого подхода связана с необходимостью испытания и доводки узлов двигателя в различных условиях, в том числе на специальных установках вне двигателя. Такой подход позволяет построить универсальные характеристики узлов, которые не зависят от условий на входе, то есть приведенные параметры, характеризующие работу данного узла, должны соответствовать стандартным значениям температуры и давления в сечении на входе в него. Следовательно, условия приведения для двигателя в целом и для отдельных его узлов в общем случае различны.

Параметры двигателя, приведенные к САУ по температуре и давлению в характерном сечении j , условимся обозначать « пр j ». Тогда формулы приведения для давления p_i^* и температуры T_i^* рабочего тела, работы L и относительного расхода топлива q_m , скорости потока c_i и частоты вращения ротора n , расхода рабочего тела G_i и расхода топлива G_m можно записать в более общем виде:

$$p_{i.\text{пр}.j}^* = p_i^* \cdot \frac{101325}{p_j^*};$$

$$T_{i.\text{пр}.j}^* = T_i^* \cdot \frac{288}{T_j^*};$$

$$c_{i.\text{пр}.j} = c_i \cdot \sqrt{\frac{288}{T_j^*}};$$

$$G_{i.\text{пр}.j} = G_i \cdot \frac{101325}{p_j^*} \cdot \sqrt{\frac{T_j^*}{288}};$$

$$L_{\text{пр}.j} = L \cdot \frac{288}{T_j^*};$$

$$n_{\text{пр}.j} = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_j^*}};$$

$$G_{m.\text{пр}.j} = G_m \cdot \frac{101325}{p_j^*} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_j^*}}.$$

$$q_{m.\text{пр}.j} = q_m \cdot \frac{288}{T_j^*};$$

Подчеркнем, что необходимость определения параметров, приведенных к САУ по температуре и давлению в сечении ВВД, возникает как при экспериментальном исследовании двигателя, например, для уточнения по результатам испытаний характеристики компрессора ВД, так и при различных расчетах.

Приведенный расход воздуха $G_{\text{ВВД. пр. ВВД}}$ характеризует пропускную способность компрессора ВД и однозначно определяется площадью сечения на входе в него $F_{\text{ВВД}}$ и относительной плотностью тока в этом сечении $q(\lambda_{\text{ВВД}})$:

$$G_{\text{ВВД. пр. ВВД}} = \frac{m_e \cdot p_{\text{ВВД. пр}}^* \cdot q(\lambda_{\text{ВВД}}) \cdot F_{\text{ВВД}}}{\sqrt{T_{\text{ВВД. пр}}^*}} \cdot v_{(\text{ВВД}-\text{К})} = \frac{m_e \cdot 101325 \cdot q(\lambda_{\text{ВВД}}) \cdot F_{\text{ВВД}}}{\sqrt{288}} \cdot v_{(\text{ВВД}-\text{К})};$$

$$G_{\text{ВВД. пр. ВВД}} = 241 \cdot q(\lambda_{\text{ВВД}}) \cdot F_{\text{ВВД}} \cdot$$

В ряде случаев, например при выборе закона регулирования двигателя, необходимо анализировать соотношение между частотой вращения n и температурой газа перед турбиной T_{Γ}^* . При этом удобно использовать частоту вращения, приведенную к САУ по температуре газа перед турбиной:

$$n_{\text{пр.}\Gamma} = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{\Gamma}^*}}.$$

Приведенная температура $T_{\Gamma.\text{пр.ВВД}}^*$:

$$T_{\Gamma.\text{пр.ВВД}}^* = T_{\Gamma}^* \cdot \frac{288}{T_{\text{ВВД}}^*}$$

однозначно определяется отношением $T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВВД}}^*$, которое применяется при анализе совместной работы узлов газогенератора и турбовентилятора.

Следует иметь в виду, что подобные режимы двигателя рассматривались при следующих допущениях:

- свойства рабочего тела сохраняются неизменными;
- изменение числа Рейнольдса не оказывает влияния на течение газовых потоков;
- изменение внешних условий не приводит к изменению геометрических размеров двигателя, в том числе радиальных зазоров на лопатках компрессора и турбины;
- поля давлений, температур и скоростей на входе в двигатель на различных режимах полета сохраняются подобными;
- теплообмен с внешней средой отсутствует;
- отсутствие подобия физико-химических и тепловых процессов в камере сгорания не влияет на установление подобных режимов работы двигателя.

Формулы приведения, полученные на основе принятых допущений, неточны, однако исследование принятых допущений позволяет в каждом конкретном случае определять соответствующие поправки к формулам.